

# Математическое моделирование теплового аккумулятора цилиндрической формы

Бежан Алексей Владимирович

Центр физико-технических проблем энергетики Севера Кольского научного центра РАН  
[abezh@rambler.ru](mailto:abezh@rambler.ru)

Основное назначение теплового аккумулятора (ТА) – накапливать избытки тепловой энергии и далее по мере необходимости расходовать запасённое тепло, дополняя работу источников тепловой энергии. В данной статье рассматривается способ математического описания водяного ТА цилиндрической формы, представляющего собой ёмкость с водой, которая ограничена одной цилиндрической стенкой и двумя плоскими стенками [1]. Тепловые потери такого аккумулятора будут складываться из потерь тепла через все три стенки:

$$Q_{nom} = 2Q_F + Q_L, \quad (1)$$

где  $Q_F$  и  $Q_L$  - тепловые потери соответственно через плоскую и цилиндрическую стенки ТА.

Для ТА цилиндрической формы, длина которого  $L$ , тепловой баланс математически можно представить в следующем виде:

$$\frac{d(V_{TA}C_pT_{TA})}{dt} = Q_{TA}^{(0)} - Q_{TA} - Q_{nom}, \quad (2)$$

или

$$\frac{d(V_{TA}C_pT_{TA})}{dt} = v_{TA}C_pT_{TA}^{(0)} - v_{TA}C_pT_{TA} - [2K_{2F}F_{окр}(T_{TA} - T_B) + K_{2L}D_{нар}\pi L(T_{TA} - T_B)], \quad (3)$$

где  $Q_{TA}^{(0)}$  и  $Q_{TA}$  - тепло, соответственно поступающее в ТА и выходящее из него, Вт;  $V_{TA}$  - объём теплового аккумулятора, м<sup>3</sup>;  $C_p$  - теплоёмкость воды, кВт·ч/м<sup>3</sup>·град;  $T_{TA}$  и  $T_{TA}^{(0)}$  - температура воды соответственно аккумулятора и поступающей в него, °С;  $v_{TA}$  - расход воды, поступающей и выходящей из ТА, м<sup>3</sup>/ч;  $K_{2F}$  и  $K_{2L}$  - коэффициенты теплоотдачи со стороны воздуха соответственно для плоской и цилиндрической стенок ТА, Вт/(м<sup>2</sup>·град);  $F_{окр}$  и  $D_{нар}$  - соответственно площадь и наружный диаметр плоской (торцевой) стенки ТА, выполненной в форме окружности, м<sup>2</sup> и м;  $T_B$  - температура внутреннего воздуха помещения, °С.

После преобразований уравнение (3) принимает вид:

$$\frac{d(V_{TA}C_pT_{TA})}{dt} = v_{TA}C_pT_{TA}^{(0)} - v_{TA}C_pT_{TA} - [(2K_{2F}F_{окр} + K_{2L}D_{нар}\pi L) \cdot (T_{TA} - T_B)]. \quad (4)$$

Проинтегрировав уравнение (4), можно получить экспоненциальную зависимость температуры водяного цилиндрического теплового аккумулятора от времени при начальных условиях ( $t=0$ )  $T_{TA_0}$ ,  $v_{TA_0}$ ,  $T_{TA_0}^{(0)}$ ,  $T_{B_0}$ :

$$T_{TA} = \frac{v_{TA}T_{TA}^{(0)} + \frac{(2K_{2F}F_{окр} + K_{2L}D_{нар}\pi L)T_B}{C_p}}{v_{TA} + \frac{(2K_{2F}F_{окр} + K_{2L}D_{нар}\pi L)}{C_p}} + \left( \exp \left[ - \left( \frac{v_{TA}}{V_{TA}} + \frac{(2K_{2F}F_{окр} + K_{2L}D_{нар}\pi L)}{V_{TA}C_p} \right) \cdot t \right] \right) \cdot \left( T_{TA_0} - \frac{v_{TA_0}T_{TA_0}^{(0)} + \frac{(2K_{2F}F_{окр} + K_{2L}D_{нар}\pi L)T_{B_0}}{C_p}}{v_{TA_0} + \frac{(2K_{2F}F_{окр} + K_{2L}D_{нар}\pi L)}{C_p}} \right). \quad (5)$$

Математическое моделирование работы водяного ТА цилиндрической формы в режиме ожидания тепловой нагрузки. Рассмотрим случай, когда ТА объёмом 100 м<sup>3</sup> заряжен до состояния, соответствующего температуре воды  $T_{TA_0} = 95^\circ\text{C}$ . Длина и наружный диаметр аккумулятора соответственно составляют  $L = 8$  м и  $D_{нар} = 4$  м. Предполагаем, что аккумулятор установлен в помещении, температура внутреннего воздуха которого составляет  $T_B = 10^\circ\text{C}$ . В режиме ожидания тепловой нагрузки изменение температуры воды аккумулятора происходит только вследствие потерь тепла.

Если в течение всего периода охлаждения воды будет отсутствовать поступление тепловой энергии в ТА, то он способен разрядиться до  $T_b = 10^\circ\text{C}$ . При  $K_{2F} = 30 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{град})$  время разрядки варьируется от 6.5 до 3.5 суток в зависимости от значения  $K_{2L}$ , меняющегося соответственно от 30 до 70  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{град})$  (рис. 1).

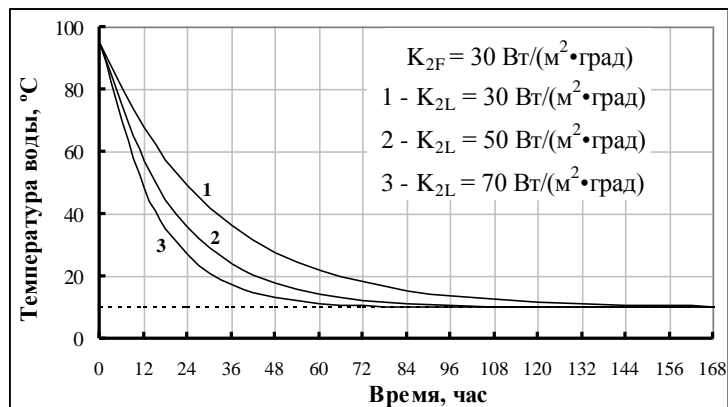


рис. 1 Зависимость температуры воды теплового аккумулятора цилиндрической формы от времени

Выводы: получена математическая модель водяного аккумулятора тепла цилиндрической формы, позволяющая прогнозировать изменение температуры воды аккумулятора во времени в зависимости от его геометрических и теплотехнических характеристик.

Список публикаций:

[1] Бежан А. В. // Труды КНЦ РАН. Серия Энергетика. Выпуск 13. Апатиты: Изд-во Кольского научного центра РАН. 2016. № 5. С.55-62.

## Моделирование влияния вращения на процессы в реакторе газовой фазной технологии

**Гичёва Наталья Ивановна**

**Дьяков Егор Андреевич**

**Томский государственный университет**

**Шваб Александр Вениаминович, д.ф.-м.н.**

[tashka-zenit@mail.ru](mailto:tashka-zenit@mail.ru)

Развитие промышленности требует высокого качества используемых материалов. Большой интерес в различных областях индустрии представляют устойчивые к деформации, коррозии, высоким температурам тугоплавкие металлы. Одним из наиболее востребованных тугоплавких металлов является вольфрам. Оптимальным и перспективным методом его получения является химическое осаждение из парогазовой фазы путём восстановления гексафторида вольфрама водородом.

В работе представлено численное моделирование гидродинамики и тепломассопереноса жидкости в вихревой камере химического реактора смешения непрерывного действия для получения тугоплавких металлов с целью отслеживания влияния вращения потока, используемого для получения равномерного слоя вещества на подложке. Реактор имеет цилиндрическую форму, выпуск газов осуществляется через трубу на оси вихревой камеры, а выпуск — через кольцевой канал на периферии камеры. Верхняя и нижняя стенка вихревой камеры могут вращаться. Нижняя стенка нагревается, остальные — теплоизолированы. Описанные процессы могут быть математически формализованы с помощью уравнений Навье-Стокса, неразрывности, переноса тепла и массы:

$$\frac{\partial u_r}{\partial t} + \frac{\partial(u_r^2)}{\partial r} + \frac{\partial(u_z u_r)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{1}{Re} \left( \frac{\partial^2 u_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{\partial^2 u_r}{\partial z^2} - \frac{u_r}{r^2} \right) + \frac{u_\varphi^2}{r} - \frac{u_z^2}{r}; \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_z}{\partial t} + \frac{\partial(u_r u_z)}{\partial r} + \frac{\partial(u_z^2)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{1}{Re} \left( \frac{\partial^2 u_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_z}{\partial r} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} \right) - \frac{u_r u_z}{r} + \frac{Gr}{Re^2} \theta; \quad (2)$$

$$\frac{\partial u_\varphi}{\partial t} + \frac{\partial(u_r u_\varphi)}{\partial r} + \frac{\partial(u_z u_\varphi)}{\partial z} = -\frac{2u_r u_\varphi}{r} + \frac{1}{Re} \left( \frac{\partial^2 u_\varphi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_\varphi}{\partial r} + \frac{\partial^2 u_\varphi}{\partial z^2} - \frac{u_\varphi}{r^2} \right); \quad (3)$$

$$\frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{\partial u_z}{\partial z} + \frac{u_r}{r} = 0; \quad (4)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + \frac{\partial(u_r \theta)}{\partial r} + \frac{\partial(u_z \theta)}{\partial z} = \frac{1}{Re \cdot Pr} \left( \frac{\partial^2 \theta}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \theta}{\partial r} \right) - \frac{u_r \theta}{r}. \quad (5)$$